

УДК 621.791

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-10-293-24-30

Л. М. Гуревич, Д. В. Проничев, О. В. Слаутин, И. А. Соколенко

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИОННОГО ПОРАЖЕНИЯ
НА ПОВЕДЕНИЕ СМК АД1-Ст3 ПРИ РАСТЯЖЕНИИ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: avatar@mail.ru

Проведено моделирование влияния коррозионного поражения на поведение биметалла АД1+Ст3 под нагрузкой, установлены закономерности деформирования биметалла с учетом возникающих дефектов и эффекта контактного упрочнения.

Ключевые слова: моделирование методом конечных элементов, биметалл алюминий-сталь, деформация, контактное упрочнение

© Гуревич Л. М., Проничев Д. В., Слаутин О. В., Соколенко И. А., 2024.

L. M. Gurevich, D. V. Pronichev, O. V. Slautin, I. A. Sokolenko

MODELING THE INFLUENCE OF CORROSION DAMAGE ON THE BEHAVIOR OF THE AD1-St3 BIMETAL UNDER TENSION

Volgograd State Technical University

The modeling of the influence of corrosion damage on the behavior of the AD1+St3 bimetal under load was carried out, the patterns of deformation of the bimetal were established taking into account the emerging defects and the effect of contact hardening.

Keywords: finite element modeling, aluminum-steel bimetal, deformation, contact hardening

Введение

Коррозия характерна для большинства металлов и сплавов, коррозионное разрушение является одной из главных причин выхода из строя металлических деталей и конструкций. Вследствие этого большое внимание уделяется вопросам защиты от воздействия агрессивных сред, в первую очередь, конструкций из традиционных сплавов, разработаны различные химические и физические методы антикоррозионной защиты, новые материалы и покрытия [1–3]. Ужесточение требований к эксплуатационным свойствам материалов для конструкций и деталей машин привело к необходимости разработки новых материалов – слоистых металлических и металло-интерметаллидных композитов. Такие материалы получают прокаткой, литьем, диффузионной сваркой, сваркой трением и т.д., но основным методом для соединения разнородных металлов, склонных к образованию интерметаллидов, является сварка взрывом [4, 5]. Формируемая при этом ярко выраженная структурная неоднородность материалов обуславливает особенности их поведения в коррозионной среде, которые в настоящее время мало изучены.

Однако уже установлено [6–9], что главными факторами, определяющими коррозионную стойкость слоистых металлических композитов (СМК), полученных сваркой взрывом, является наличие на границе соединения неоднородностей в виде оплавов и интерметаллидных прослоек, обладающих отличающимися от основных металлов электродными потенциалами.

Для СМК систем Fe-Al и Cu-Al определены многие параметры коррозионного поражения и раскрыты некоторые закономерности протекающих процессов [6, 7], однако до сих пор не было попыток оценить влияние коррозионного разрушения на механические свойства и работоспособность таких материалов.

Целью данной работы было моделирование поведения при растяжении полученного сваркой взрывом СМК АД1-Ст3 с различными величинами коррозионного поражения.

Материалы и методы исследования

Образцы СМК АД1+Ст3 для исследования были получены с применением угловой схемы сварки взрывом, что обеспечивало возможность варьирования вдоль границы соединения удельной энергии W_2 , затрачиваемой на пластическую деформацию металла [10].

Коррозионные испытания проводились по ГОСТ 9.913–85 методом циклического погружения образцов в 3%-ный раствор хлористого натрия и последующего высушивания их на воздухе (10 минут погружения / 50 минут на воздухе). Каждые 15 суток образцы очищались от продуктов коррозии и просушивались, после чего фиксировалось изменение в их микроструктуре – относительная протяженность поражения вдоль границы соединения и глубина коррозионных язв. Общая длительность испытаний составила 90 суток.

Исследование микроструктуры и глубины коррозионного поражения выполнялись на модульном металлографическом моторизованном микроскопе Olympus BX61, оснащенный цифровой камерой DP-12. 3D реконструкция рельефа проводилась методом фотосъемки с одного ракурса, но с различным положением фокальной плоскости, и последующей обработкой изображений в программе Combine ZP.

Моделирование поведения при растяжении полученного сваркой взрывом СМК АД1-Ст3 с различными величинами коррозионного поражения с расчетом напряженно-деформированного состояния проводилось в программном комплексе SIMULIA/Abaqus, предназначенном для конечно-элементных расчетов. Геометрические размеры образцов, применяемых для моделирования влияния дефектов, образующихся при коррозионном поражении сваренного взрывом биметалла АД1+Ст3, на характер деформирования при нагружении определялись на основании требований ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» [11]. Был выбран пропорциональный образец без головок № 11. Поскольку при моделировании нет

необходимости в площадках для захвата образца приспособлениями разрывной машины, в используемой модели эти площадки не задавались. Сечение образца по ГОСТ 1497–84 составило 30 мм (b_0) $\times$ 15 мм (a_0). Торцы моделируемого образца прикреплялись к двум абсолютно жестким захватам: для поверхностей контакта алюминиевого и стального торцов образца с захватами задавали прочное сцепление (контакт Tie). Захват со стороны АД1 был неподвижен,

а прикрепленный к стали Ст3 перемещался со скоростью 3 мм/с в течение 10 с).

На основании полученных экспериментальных данных при моделировании в пакете программ SIMULIA/Abaqus для имитации коррозионного поражения были выбраны канавки треугольного равнобедренного поперечного сечения, расположенные у поверхности соединения со стороны алюминия, размеры катетов которых варьировались от 0 до 2,0 мм (рис. 1).

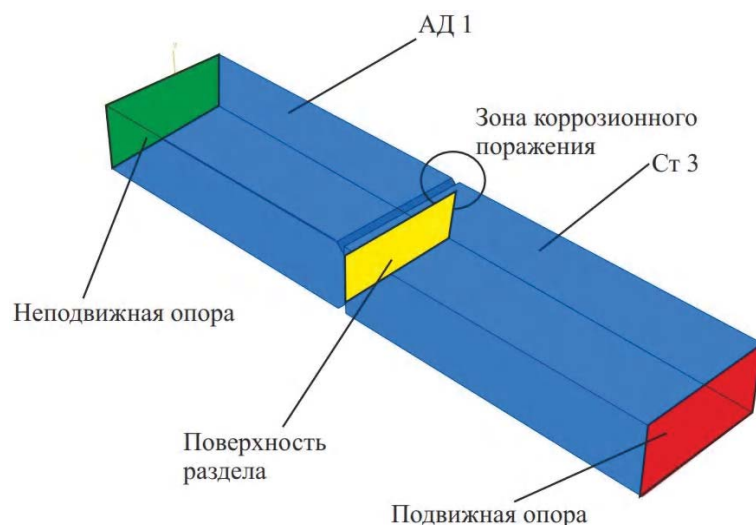


Рис. 1. Моделируемый образец СМК АД1+Ст3 с дефектом коррозионного поражения

Конечно-элементная сетка в АД1 имела переменную размерность, для повышения точности расчетов на поверхности раздела число ячеек удваивалось (рис. 2, а), сетка стали Ст3 име-

ла постоянный размер 1,0 мм ячеек типа C3D8R (континуальные трехмерные восьмиугольные элементы с редуцированным интегрированием) (рис. 2, б).

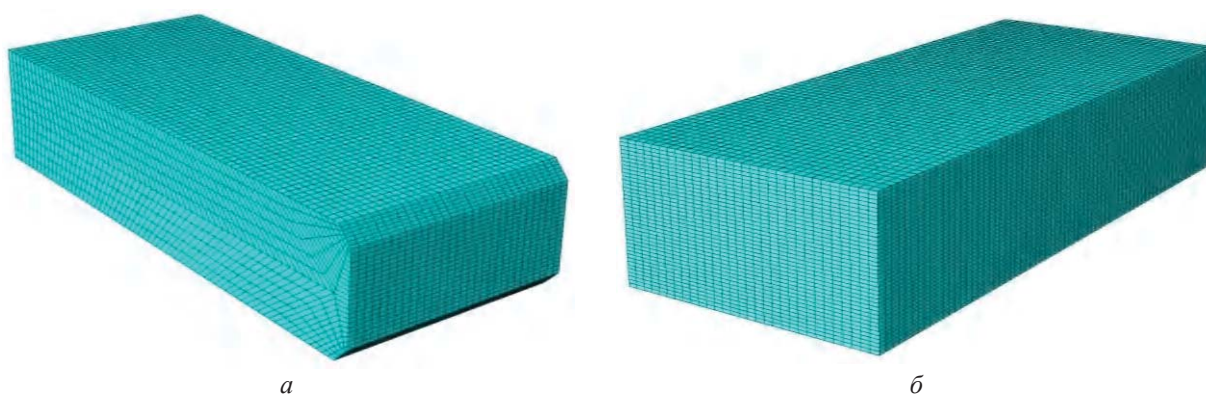


Рис. 2. Конечно-элементные сетки в деталях из АД1 (а) и Ст3 (б) со стороны контактирующих торцов

Результаты эксперимента

Анализ микроструктуры показал, что количество и площадь оплавов на границе соединения определяется величиной энергии W_2 , в связи с чем были выделены четыре типа структур

(табл. 1) с различной протяженностью оплавленных участков.

Коррозионные испытания, проведенные по ГОСТ 9.913–85 методом циклического погружения в 3%-ный раствор хлористого натрия,

показали, что разрушение начинается в оплавах, затем распространяются вдоль границы соединения и вглубь, локализуясь в слое алюминия. С течением времени (после 60 суток испы-

тания) отдельные очаги поражения (рис. 3, а) сливаются, образуя вдоль границы непрерывный дефект в виде канавки треугольного профиля (рис. 3, б).

Таблица 1

**Характеристики типичных структур,
полученных при сварке взрывом биметалла АД1+Ст3**

Типы среды структур	I	II	III	IV
Энергия, расходуемая пластическую деформацию, W_2 , МДж/м ²	1,1–1,4	1,4–1,6	1,6–1,8	1,8–2,1
Относительная протяженность оплавов, %	0	2–5	15–25	65–75



Рис. 3. 3D-реконструкция профиля коррозионных поражений на начальном (а) и конечном (б) этапе испытаний

Глубина коррозионного поражения возрастала с увеличением энергии W_2 и длительно-

сти испытаний (табл. 2), достигая после 60 суток 2 мм.

Таблица 2

Глубина коррозионного поражения на границе соединения АД1 и Ст3

Длительность испытаний, сут.	Глубина коррозионного поражения, мм			
	$W_2 = 1,2–1,4$ МДж/м ²	$W_2 = 1,4–1,6$ МДж/м ²	$W_2 = 1,6–1,8$ МДж/м ²	$W_2 = 1,8–2,1$ МДж/м ²
15	0	0	0	0
30	0	0	0,2	0,6
45	0	0	0,3	0,75
60	0	0,15	0,5	1,0
75	0,1	0,49	0,8	1,5
90	0,3	0,75	1,0	2,0

Моделирование деформирования биметалла АД1 + Ст3 в исходном состоянии (без коррозионного поражения) показало (рис. 4), что уже на начальном этапе локализация деформации происходит в алюминиевой части биметалла на значительном удалении от поверхности соединения со сталью, где напряжения превышают предел текучести алюминия и достигают 65–75 МПа. При этом вблизи границы соединения со сталью деформация не наблюдается. Такое поведение материала объясняется проявлением контактного упрочнения – повышение сопротивления деформированию мягкого слоя

сварного соединения за счет сдерживания ее поперечных деформаций соседними более прочными его частями [12].

При дальнейшем деформировании в алюминии на некотором расстоянии от границы раздела алюминия и стали формируется шейка, в области которой и происходит дальнейшее пластическое течение алюминия, сопровождающееся снижением напряжений в остальных зонах биметалла.

Таким образом, в отсутствие дефектов разрушение при нагружении будет происходить по слою алюминия.

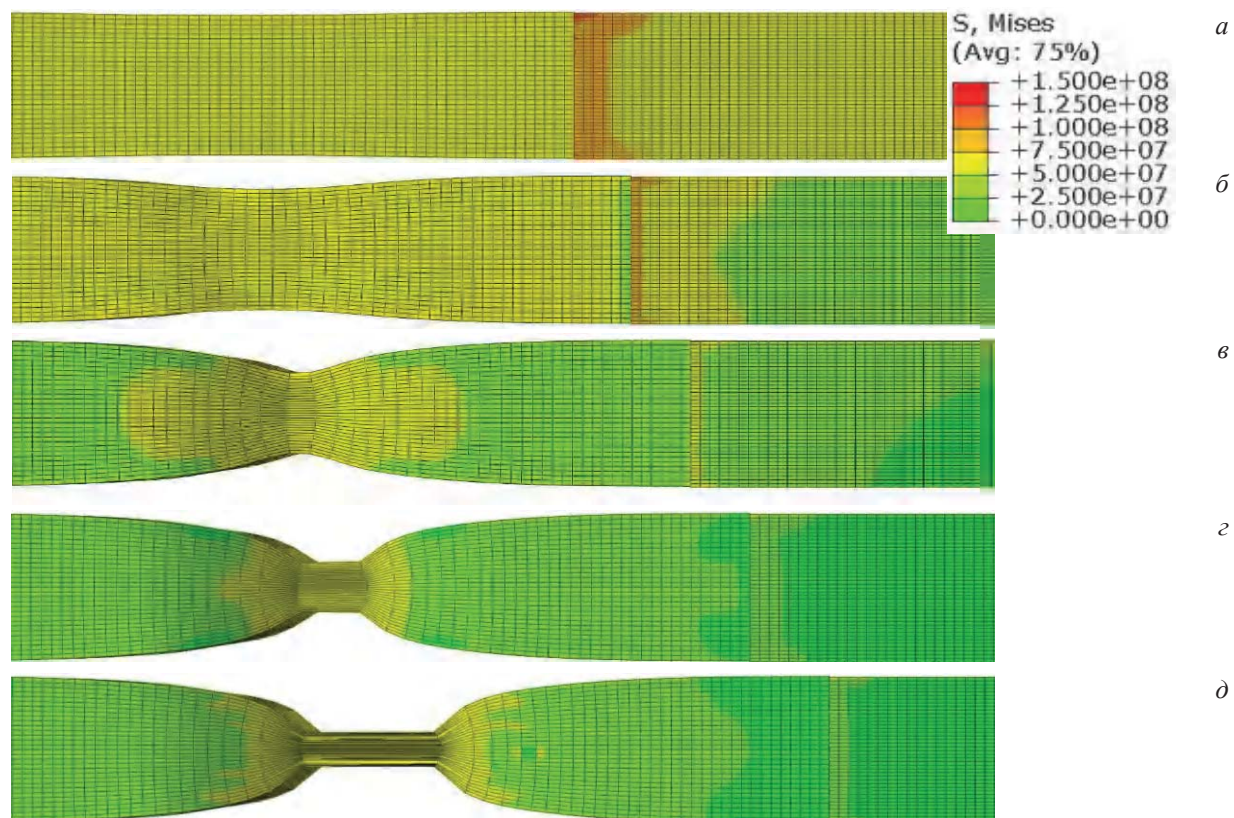


Рис. 4. Распределение напряжений Мизеса в биметалле АД1+Ст3, не подверженном коррозионному поражению:
а-д – 1, 3, 5, 7 и 10 секунд деформирования со скоростью 3 мм/с соответственно

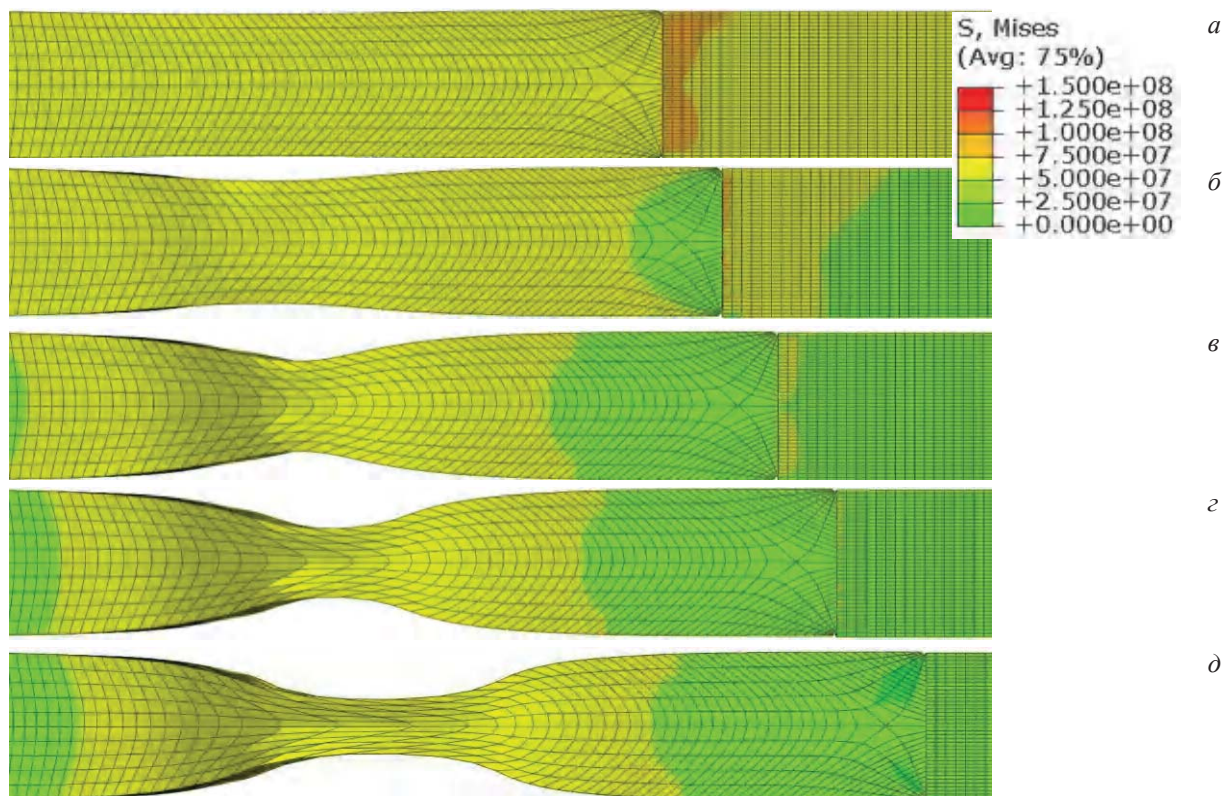


Рис. 5. Распределение напряжений Мизеса в биметалле АД1+Ст3, с глубиной коррозионного поражения 0,5 мм:
а-д – 1, 3, 5, 7, 10 секунд деформирования со скоростью 3 мм/с соответственно

Добавление в модель дефекта (канавки треугольной формы с катетом 0,5 мм) качественно не изменяет характер деформирования биметалла – наблюдается локализация деформации в середине слоя алюминия, однако разгрузка

в приграничной области хоть и начинается раньше, но распространяется вглубь слоя АД1 на гораздо меньшее расстояние. В результате этого течение в области шейки происходит менее интенсивно (рис. 5).

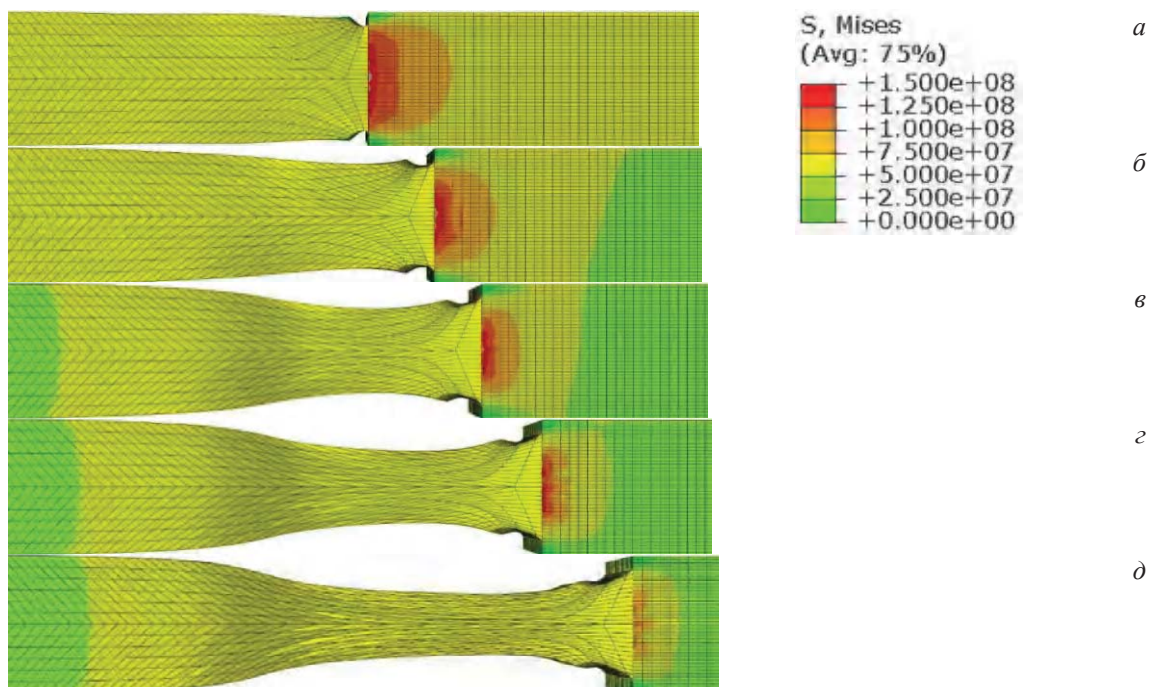


Рис. 6. Распределение напряжений Мизеса в биметалле АД1+Ст3 с глубиной коррозионного поражения 1 мм:
а-д – 1, 3, 5, 7, 10 секунд деформирования со скоростью 3 мм/с соответственно

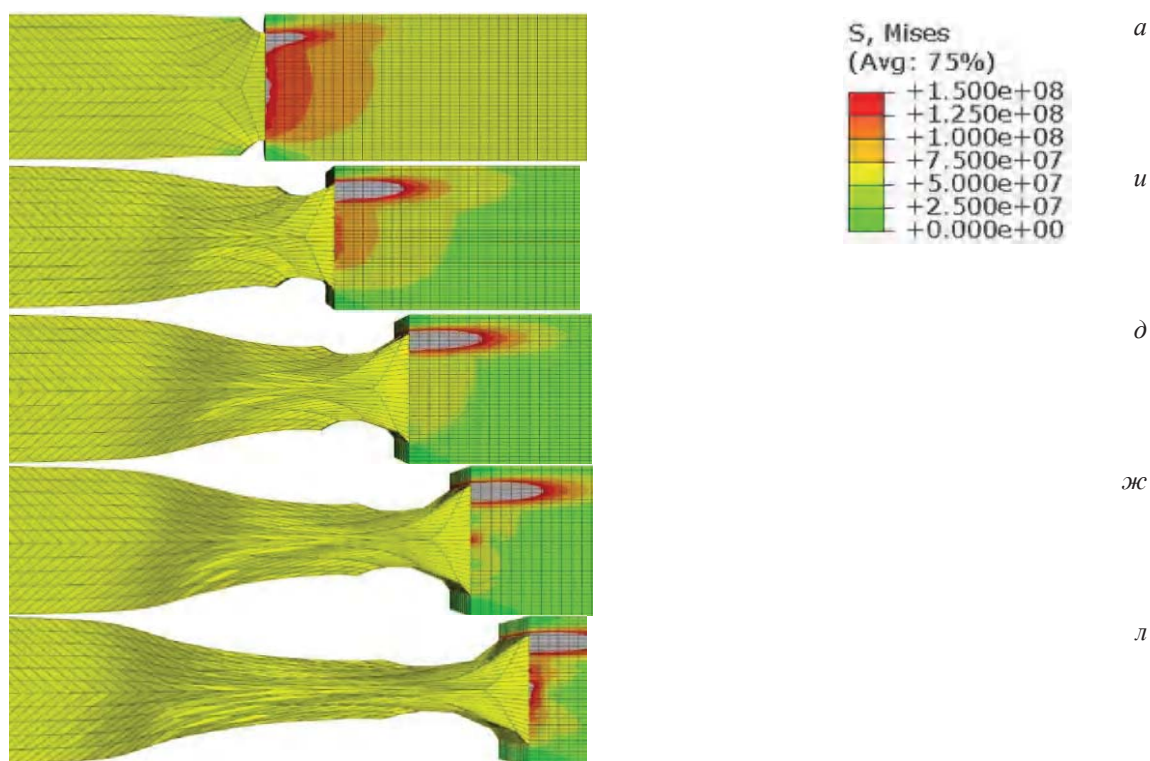


Рис. 7. Распределение напряжений Мизеса в биметалле АД1+Ст3 с глубиной коррозионного поражения 2 мм:
а-д – 1, 3, 5, 7, 10 секунд деформирования со скоростью 3 мм/с соответственно

Увеличение размера катета дефекта до 1 и более мм (рис. 6 и 7) вызывает значительные изменения в характере процесса деформирования, наблюдается перенос концентрации деформации с центра слоя АД1 в приграничную зону, где напряжения в слое АД1 превышают предел его текучести, а эффект контактного упрочнения перестает оказывать достаточное влияние.

При этом, если при размере катета дефекта 1 мм эффект контактного упрочнения еще проявляется в том, что максимальная деформация наблюдается не в самом дефекте, а в области, непосредственно к нему примыкающей, то при увеличении до 2 мм деформация концентрируется непосредственно в зоне коррозионного поражения.

Выводы

1. Проведенное компьютерное моделирование показало, что при деформировании слоистого материала с дефектами коррозионного поражения действуют два основных фактора:

- ослабление несущей способности материала в областях коррозионного поражения, вызванное как появлением концентраторов напряжений, так и уменьшением сечения;

- действие эффекта контактного упрочнения, частично компенсирующее влияние первого фактора.

2. Характер деформирования и разрушения биметалла с коррозионным поражением будет определяться балансом влияния выше указанных двух факторов, зависящих от соотношения толщины материала и глубины коррозионных дефектов.

3. Количественное определение опасности сформировавшихся коррозионных повреждений может быть проведено моделированием методом конечных элементов в каждом конкретном случае.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенова, И. В. Коррозия и защита от коррозии / И. В. Семенова, Г. М. Флорианович, А. В. Хорошилов ; под ред. И. В. Семеновой. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 336 с.
2. Коррозионная стойкость оборудования химических производств: способы защиты оборудования от коррозии : справ. изд. ; под ред. Б. В. Строкана, А. М. Сухотина. – Л. : Химия, 1987. – 280 с.
3. Кемхадзе, В. С. Коррозия и защита металлов во влажных субтропиках / В. С. Кемхадзе. – Москва : Наука, 1983. – 107 с.
4. Трыков, Ю. П. Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгул. – Москва : Metallurgizdat, 2004. – 230 с.
5. Рябов, В. Р. Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами / В. Р. Рябов. – Киев : Наукова думка, 1983. – 264 с.
6. Исследование влияния режимов сварки взрывом и термической обработки на структуру и свойства биметалла АД1- сталь Ст3 / Л. М. Гуревич, Д. В. Проничев, А. Ф. Трудов [и др.] // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9 (136) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – С. 17–21.
7. Исследование коррозионной стойкости биметалла АД1+Ст3 / Д. В. Проничев, Л. М. Гуревич, Ю. П. Трыков [и др.] // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 23 (150) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – С. 15–18.
8. Исследование коррозионной стойкости биметалла АД1+Ст3 / Д. В. Проничев, Л. М. Гуревич, М. Д. Трунов, В. М. Ястребов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 5 (160) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – С. 24–28.
9. К вопросу о коррозионной стойкости полученных сваркой взрывом биметаллов состава медь М1 +алюминий АД1 после их термообработки с использованием ультразвукового воздействия / О. В. Слаутин, Д. В. Проничев, В. П. Кулевич, С. А. Кузнецов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 10 (269) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 23–26.
10. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – М. : Машиностроение - 1, 2005. – 543 с.
11. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение : введ. 01.01.1986.
12. ГОСТ 2601–84. Сварка металлов. Термины и определения основных понятий : введ. 01.07.1985.